

超音波振動輔助難削材加工之研究

文/蔡明義、林岳鋒、張嘉泰、楊家豪

關鍵字：超音波輔助加工、難切削材、刀具磨耗

近幾年來，難削材的加工技術已經成為新的研究熱點，研究成果與以往相比，雖然提高了技術水準，但由於其加工過程複雜，影響因素眾多，難削材加工技術的研究仍存在許多急需解決的問題。本文以CNC加工機台架設超音波刀把振動輔助難切削材包括鈦合金、鎳基合金(Inconel 718)、光學模具鋼(STAVAX)與藍寶石等材質，並建立超音波輔助加工的基本特性及工件表面形貌與刀具磨耗。另外亦探討不同難削材合適製程參數及其對材料表面形貌之影響。實驗結果顯示刀具伸出長度及鎖緊力對刀具振幅有一定的影響程度。適當的振幅對鈦合金與Inconel 718加工才會有較佳的效果，過大的振幅反而會使表面粗糙度急遽上升，刀具磨耗增加等負面效果。Inconel 718材料振幅達 $5.04\mu\text{m}$ ，磨耗較明顯。此外超音波輔助加工經實驗證實可有效改善刀具磨耗的情形。在藍寶石方面，使用超音波輔助鑽石磨棒斜向進刀的方式其表面粗糙度較佳的趨勢，臨界切深可提升至 $50\mu\text{m}$ ，鑽石粒徑較大($250\mu\text{m}$)的鑽石磨棒脫落及磨耗較少，且切屑較不易附著在鑽石磨棒的磨削面上。

前言

隨著科技進展與社會演進(環保綠能、智能化機械與少子化趨勢)，先進製造技術在未來新興產業所扮演的角色愈來愈重要。傳統機械加工難以切削或甚

至不能做到切削的材料可稱為「難削材料」，如金屬類之鈦基，鎳基超合金，與非金屬類之藍寶石水晶玻璃、碳化矽、氧化鋯、碳纖複合材料等等。但因其機械性質優異，適合於航太、汽車、醫工產業、與精密光學零件、光電與應

用十分廣泛。近年來，國內工具機市場的變化相當迅速，由汽車發展到3C、光電、生醫進而到現在的航太產業，隨著市場的變化，加工材料也由傳統的鋁、鋼、鐵、銅等單純構型實心的零件進展到現今的硬脆材料(玻璃、陶瓷)、高碳鋼(模具鋼)、高溫合金、非鐵合金(鈦、鉻鎳合金)等中空、薄壁、複雜孔位等零件，由於加工材料性質的不同，工件型態精度要求更嚴苛，目前脆硬材料切削加工的困難點普遍存在於加工因素匹配不當易產生脆裂邊與刀具磨損快速等問題，材料愈硬加上硬化層越深導致加工的難度與技術門檻大為提高。許多的研究與實例顯示超音波加工是硬脆材料加工的有效方法，迴轉式超音波輔助加工(Rotary Ultrasonic Machining；RUM)是利用傳統機械結合超音波振動的複合式加工方法，移除材料的方式是以原有的機制來移除，而超音波則是賦予額外的能量，使原本連續性的切削變為間斷性的切削；有別於超音波加工(Ultrasonic machining；USM)藉由超音波振動使磨料漿體產生能量進而達成材料移除的目的[1-8]。

本文針對五種難切削材(鈦合金、Inconel

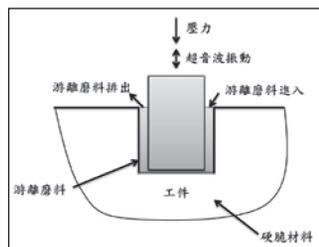


圖1 超音波加工示意圖

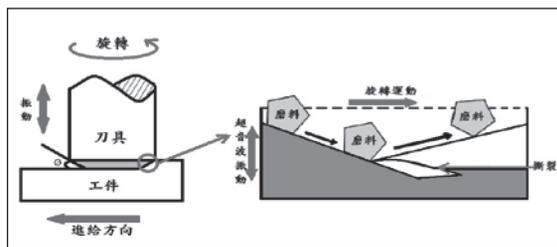


圖2 旋轉超音波輔助加工示意圖

718、光學模具鋼和藍寶石)，進行案例之探討，建立超音波刀把的基本特性及工件表面形貌與探討刀具磨耗的情形，希望藉由不同難削材對有無超音波輔助之敏感程度差異來檢視超音波輔助加工是否對於所有硬脆材或難削材都有一定的加工效能，透過加工驗證達到提升刀具壽命與切削效能，也提高工件精度與品質，達到高質化的切削效果。

實驗設備與條件

超音波加工是利用浸泡於磨料混合液中，以高頻率的振動進行加工，其振動頻率一般均大於20KHz，工具的形狀需與工件預加工的形狀相同，工具高速往復的振動，驅使液體中磨料高頻率的振動衝擊工件表面，來進行材料的去除，(如圖1所示)。旋轉式超音波輔助加工是利用傳統旋轉運動結合超音波振動的複合式加工方法，移除材料的機制，(如圖2所示)，使原本連續性的切削行為轉變成間斷性的方式；能使切削液能順利進入帶走切屑，減少工件與刀具間的

切削阻力與降低刀具的磨耗情形延長刀具的壽命。超音波刀把之所以能將刀具產生一定振幅的高頻振動是靠刀具內的壓電材料所致，而壓電材料為一種電介質材料，它能使機械能與電能產生互換的關係。

本實驗所使用超音波刀把為漢鼎智慧科技股份有限公司製造，振動頻率為20~32KHz，振幅範圍為1~10 μ m。刀把裝置於CNC銑床主軸上，並將刀具固定於刀把上，使其刀尖產生超音波振動，詳細規格如表1及圖3所示。實驗用刀具為直徑6mm立銑刀，螺旋角為45度，並且在表層鍍上TiAlN和中澤公司所生產之鑽石磨棒。將超音波刀把裝至CNC主軸上，經由控制器驅動使刀具產生振幅後開始銑削工件。

超音波銑削實驗所架設之機台是使

表1 超音波刀把規格

最高轉速	12000rpm
動平衡	G2.5/25000rpm
刀具4D處保證偏擺	<5 μ m
振動頻率	20~32KHz
振幅範圍	1~10 μ m

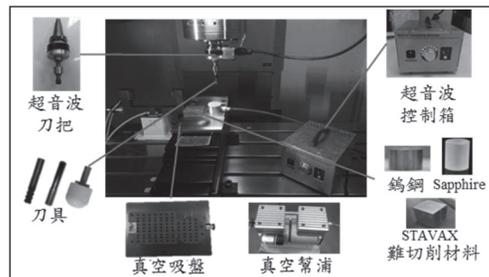


圖3 超音波振動輔助加工系統配置

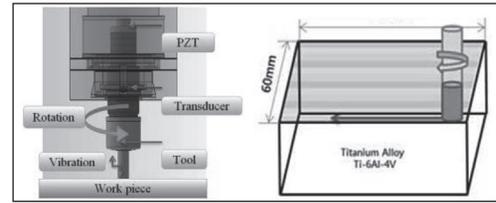


圖4 實驗加工路徑示意圖

<p>材料: 鈦合金 線速度Vc: 60 m/min 每刃進給f: 0.05 mm/fz 切深a_p: 0.10 mm 切寬a_e: 3.0 mm 超音波頻率: 30KHz 振幅: 0 μm、3.04 μm、3.84 μm、4.32 μm、4.64 μm、5.04 μm</p>	<p>材料: Inconel 718 線速度Vc: 18 m/min 每刃進給f: 0.05 mm/fz 切深a_p: 0.10 mm 切寬a_e: 3.0 mm 加工方式: 順銑 超音波頻率: 30KHz 振幅: 0 μm、3.44 μm、4.24 μm、5.04 μm</p>
<p>材料: 光學模具鋼(STAVAX) 線速度Vc: 113 m/min 每刃進給f: 0.004 mm/fz 切深a_p: 0.01 mm 切寬a_e: 2.0 mm 超音波頻率: 25、50KHz 振幅: 0 μm、2.2 μm</p>	<p>材料: 藍寶石 鑽石粒徑: 250 μm、38 μm 線速度Vc: 113 m/min 每轉進給f: 60、30 mm/rev 切深a_p: 0.02、0.007 mm 切寬a_e: 6.0 mm 超音波頻率: 25KHz 振幅: 2.0 μm、4.1 μm</p>

圖5 鈦合金、Inconel 718、光學模具鋼 (STAVAX)與藍寶石加工參數

用百德機械股份有限公司所生產的立式三軸CNC銑床，型號為MV184C，其相關配置(如圖3所示)。加工路徑示意圖(如圖4所示)，鈦合金、Inconel 718、光學模具鋼和藍寶石之合適加工參數(如圖5所示)。

結果與討論

超音波刀把的基本特性

為了探討刀具伸出長度及鎖緊力對振幅的影響及建立穩定的實驗數據，首先利用雷射位移計來量測刀具參數對振

幅的影響。圖6為刀具不同伸出長度，鎖緊力固定為15Nm時，根據所輸入超音波控制格數大小與刀具位移量(μm)的關係，從圖中可以發現在刀具伸出長度為40mm時，前段部分振幅與格數間幾乎呈現線性關係，而後段振幅則呈現非線性的情況發生，這可能是由於壓電材料本身的阻抗造成振幅值暫時降低；而刀具伸出長度25mm時振幅近線性關係的情況。在同樣鎖緊力15Nm的狀態下，刀具伸出長度25mm比40mm的振幅要來的穩定。圖7為刀具伸出長度25mm時使用不同的鎖緊力與振幅之間的關係圖，當使用10 Nm時在中後段時振幅會趨近

於平緩，這是因為鎖緊力不足，導致振動無法傳遞至刀具上的緣故，而在使用15、20、25Nm時刀具會隨著輸入的超音波控制格數越大振幅值越大，但使用過大的鎖緊力會導致刀把產生偏擺，因此本組實驗建議鎖緊扭力為15Nm。

超音波輔助對鈦合金加工特性之影響

圖8為有無超音波輔助對鈦合金表面粗糙度之影響程度，實驗結果顯示：不同的振幅會造成深淺不一的紋理在鈦合金表面上，粗糙度的量測結果顯示：有超音波輔助振幅在4.64μm時，表面粗糙度最佳可達到0.143μm，與無超音波輔助加工時的表面粗糙度0.388μm相比，有超音波輔助加工鈦合金時，表面粗糙度可相差下降至1.5倍，但實驗結果顯示，並非振幅越大，所得之表面粗糙度越佳，持續提高振幅對表面粗糙度並未有更好的效果，當振幅達到5.20μm時，甚至惡化超過無超音波輔助之標準，表面粗糙度提升的程度與最低值可上升至2.3倍，來到0.664μm，建議振幅在4.64μm時，可得最佳之表面粗糙度。圖9為鈦合金隨著加工時間增加鈦合金表面品質的變化情形，經光學顯微鏡觀察可知，無超音波輔助的鈦合金表面紋理較深，且深淺不一，隨著加工時間的增加，伴隨著適當的振幅，有助於改善紋理深淺不一的問題，得到較為平順的表

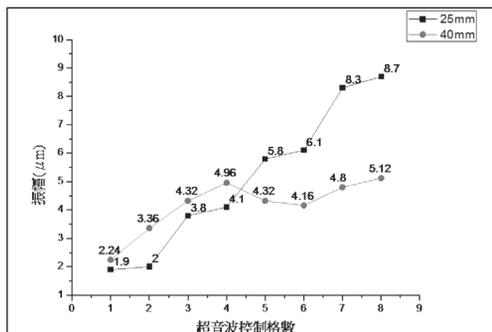


圖6 刀具伸出長度與振幅的關係

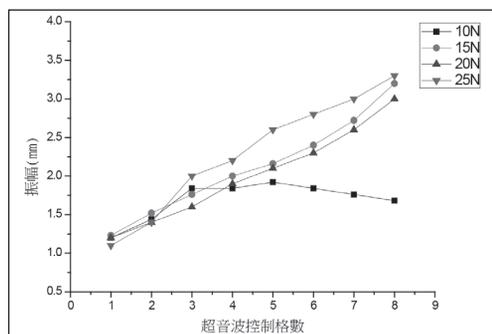


圖7 刀具鎖緊力與振幅的關係

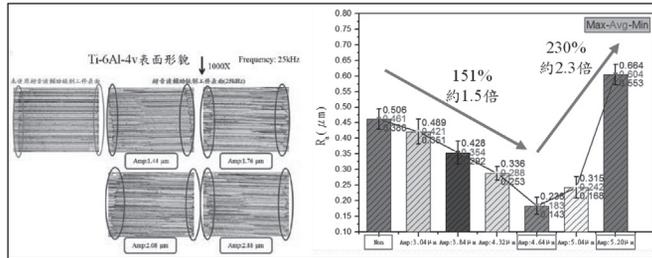


圖8 有無超音波輔助在不同振幅下對鈦合金表面粗糙度之影響

崩刀的情形發生，刀具尖點發生剝離表示此刀具已無法再經由重磨的方式再次進行加工，也顯示加工鈦合金的超音波振幅不宜超過4.64μm。

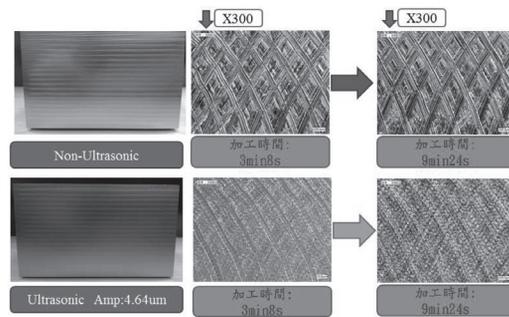


圖9 鈦合金隨著加工時間增加表面品質的變化情形

超音波輔助對Inconel 718加工特性之影響

圖11為有無超音波對Inconel 718實際加工成品圖，實驗結果證實此方法確實可行，有超音波輔助加工Inconel 718確實有助於降低工件的表面粗糙度，實際量測之最佳表面粗糙度值為0.167μm，與無超音波輔助比較可下降67%，但Inconel 718也與鈦合金有相同的趨勢，持續提高振幅對Inconel 718表面粗糙度並未有更好的效果，當振幅持續提高至5.04μm時，表面粗糙度將提升至1.8倍，所量測之表面粗糙度最高可達0.704μm，也是超過無超音波輔助之標準，建議搭配振幅在4.24μm時，可達到最佳之表面加工效益。圖12為Inconel 718在不同振幅下表面品質的變化情形，實驗結果顯示：振幅確實對Inconel 718的表面品質有顯著的影響，這與所量測到的表面粗糙度值是可以對應的，且有一定程度的改善，這表示適當的振幅對加工Inconel 718是有幫助且有效果的，但若

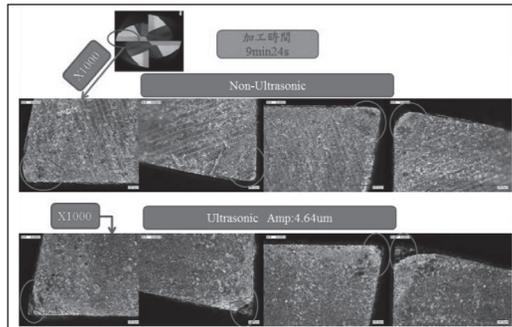


圖10 有無超音波輔助對鈦合金刀具磨耗之影響

面紋理。

接下來將探討有無超音波輔助加工鈦合金對刀具磨耗之影響，(如圖10所示)，實驗中將以相同加工時間來進行同步測試，以加工9分24秒的時間來看，放大1000倍，觀察刀具的磨耗是以刀腹磨耗為主，無超音波輔助時的刀具是以輕微的磨耗為主，但振幅至4.64μm時，已有

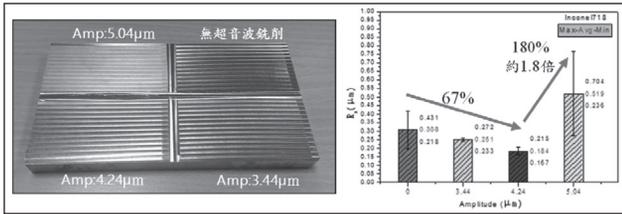


圖11 有無超音波輔助在不同振幅下對Inconel 718表面粗糙度之影響

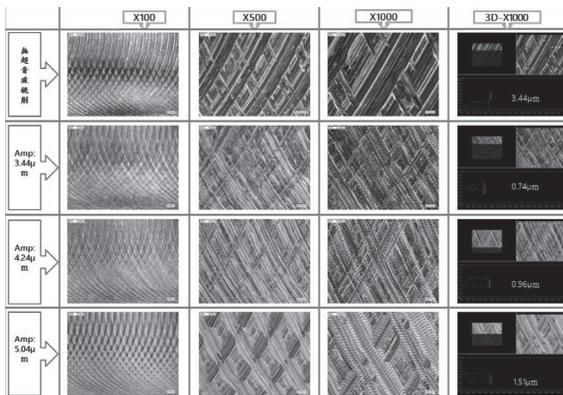


圖12 Inconel 718在不同振幅下表面品質的變化情形

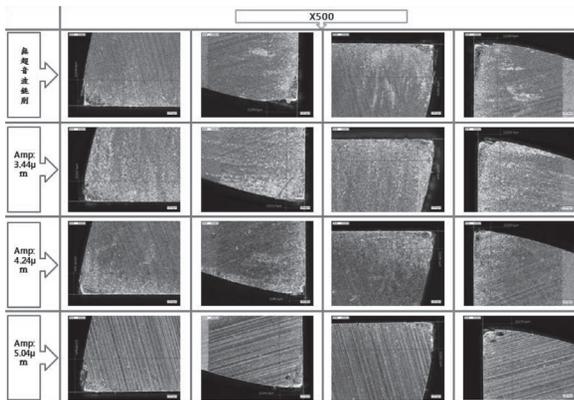


圖13 有無超音波輔助對Inconel 718刀具磨耗之影響

振幅調整過大造成加工時刀尖崩角情形發生會導致無法有效進行切削造成面粗糙度不佳。

圖13顯示不同振幅對Inconel 718刀

具磨耗之影響，實驗結果顯示，無超音波輔助加工時，刀具便有產生磨耗的情形，當振幅於控制在3.44µm至4.24µm時刀具磨耗差異不大，但當振幅達5.04µm，刀具尖點一樣會發生剝離的現象，此時刀具一樣不再具備移除材料的能力，建議搭配之振幅不要超過4.24µm。

超音波輔助對光學模具鋼 (STAVAX)加工特性之影響

圖14為有無超音波對光學模具鋼(STAVAX)實際加工結果顯示，未超音波輔助之光學模具鋼(STAVAX)之表面紋理雖然具有等向性之紋理，但紋理的深度較深，這是傳統機械力刺入工件所造成的結果，實驗中發現不同的頻率也會對光學模具鋼表面造成影響，(如圖15所示)，50KHz的頻率會比25KHz的頻率效果更為顯著，在表面粗糙度方面，超音波輔助加工光學模具鋼時，建議搭配振幅

2.2µm時，所量測之最佳表面粗糙度值為0.158µm，與無超音波輔助相比較，表面粗糙度約可下降1倍，(如圖16所示)，實驗中也觀察到，不同的刀具螺旋

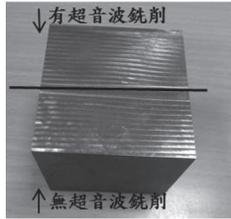


圖14 光學模具鋼 (STAVAX)成品圖

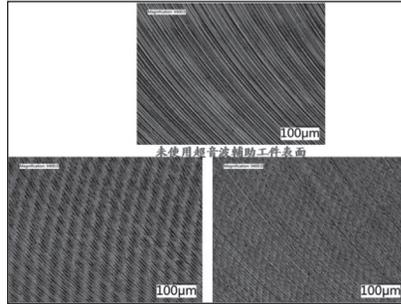


圖15 不同頻率對光學模具鋼(STAVAX)表面之影響

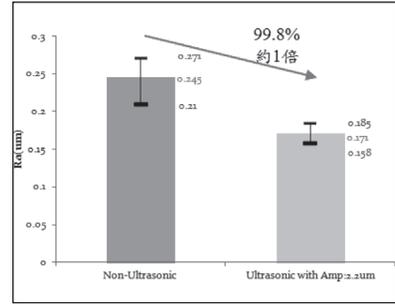


圖16 有無超音波輔助對光學模具鋼表面粗糙度之影響

角也會對表面粗糙度有影響，刀具螺旋角在 45° 時，搭配振幅在 $2.2\mu\text{m}$ 時可得到最佳表面粗糙度，實際量測到之表面粗糙度為 $0.120\mu\text{m}$ ，(如圖17所示)。

在刀具磨耗方面，不同刀具螺旋角也會對刀具磨耗有顯著之影響，實驗中使用三種不同角度之刀具螺旋角，分別為 25° 、 35° 與 45° ，(如圖18、圖19、圖20所示)，不論使用何種角度的刀具螺旋角，使用超音波輔助均能減少刀具的磨耗，螺旋角 45° 刀具磨耗的改善特別明顯，未使用超音波輔助加工前刀具磨耗

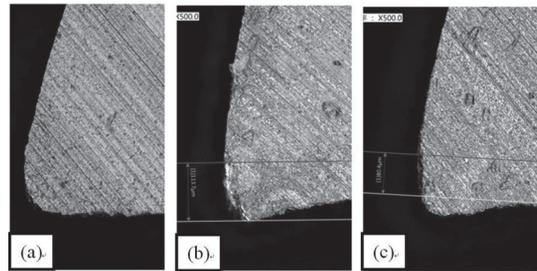


圖18 刀具螺旋角 25° (a)刀具未使用前(b)未使用超音波輔助(c)使用超音波輔助

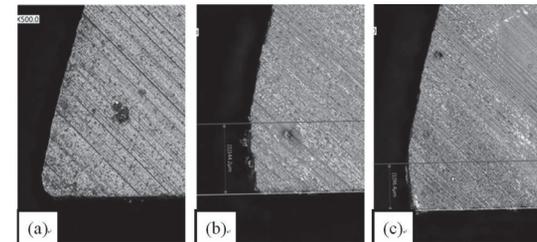


圖19 刀具螺旋角 35° (a)刀具未使用前(b)未使用超音波輔助(c)使用超音波輔助

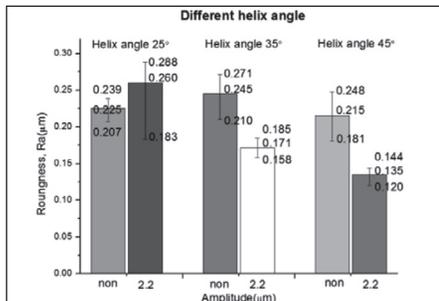


圖17 不同刀具螺旋角對光學模具鋼表面粗糙度之影響

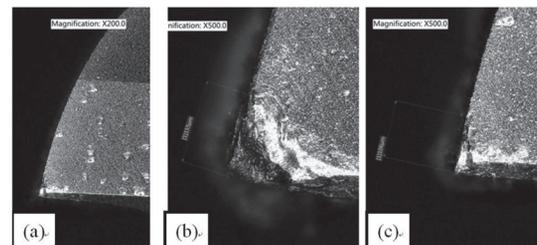


圖20 刀具螺旋角 45° (a)刀具未使用前(b)未使用超音波輔助(c)使用超音波輔助

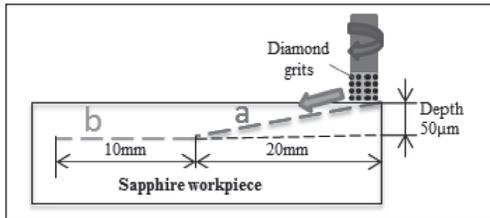


圖21 (a)斜向與(b)水平磨削路徑實驗示意圖

較為嚴重，使用超音波輔助加工後反而有助於改善刀具磨耗的情形。

超音波輔助對藍寶石加工特性之影響

採用斜向進刀磨削的方式來探討藍寶石加工臨界切削深度，使用主軸轉速6000 rpm、超音波振幅2 μm及鑽石粒徑為150μm進行實驗。斜向進刀之磨削深度由0至50μm，磨削路徑採斜向進刀20mm後，再水平進刀10mm，磨削路徑實驗示意圖，(如圖21所示)。圖22為有無超音波斜向與水平磨削後之藍寶石表面形貌。結果顯示無超音波磨削後之表面形貌，在側邊及底邊皆有輕微裂痕，而有超音波輔助磨削，其表面較光滑平整。此外量測表面粗糙度亦顯示有超音

波斜向進刀的表面粗糙比無超音波斜向進刀來得佳，(如圖23所示)。一個有趣現象發現，加入轉速及超音波，其臨界切深大幅提升至50μm，未來可考慮使用此加工方式

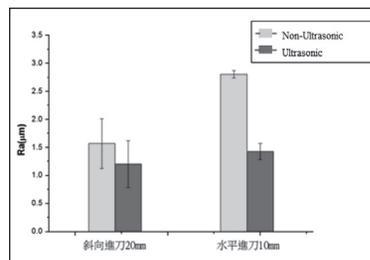


圖23 斜向與水平進刀表面粗糙度之比較

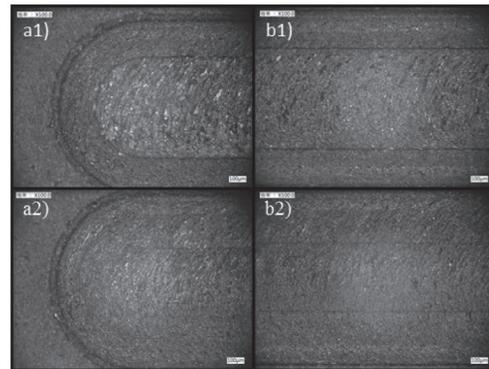


圖22 (a1)水平進刀無超音波表面形貌(倍率100)；(a2)水平進刀有超音波表面形貌(倍率100)；(b1)斜向進刀無超音波表面形貌(倍率100)；(b2)斜向進刀有超音波表面形貌(倍率100)

於硬脆材加工應用上。

接著進行超音波輔助對藍寶石加工表面粗糙度的影響，為要確認且提高實驗的再現性，進行三次實驗。實驗結果顯示：鑽石粒徑250μm的無超音波加工之表面粗糙度相對較差，(如圖24所示)。有超音波輔助加工的表面有較佳的趨勢。圖25顯示當無超音波輔助加工時，藍寶石切屑易附著於鑽石磨棒上。有超音波輔助加工時之鑽石磨棒較無切

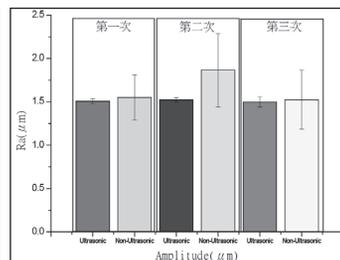


圖24 鑽石粒徑250μm有無超音波之比較

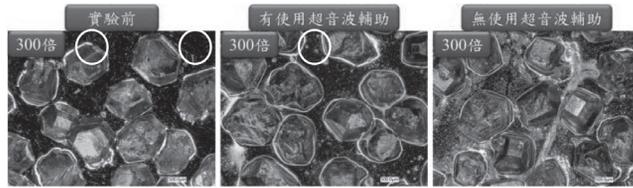


圖25 鑽石粒徑250µm有無超音波之比較

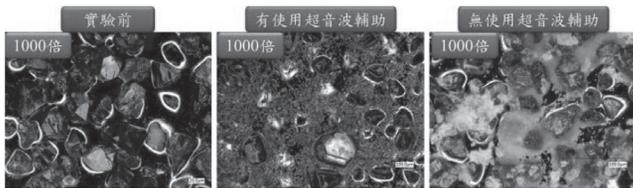


圖27 鑽石粒徑38µm有無超音波輔助之比較

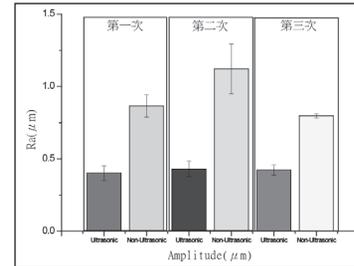


圖26 鑽石粒徑38µm有無超音波輔助之比較

屑殘留。

圖26為鑽石粒徑38µm有無超音波輔助加工之比較，實驗結果顯示：有施加超音波的表面粗糙度較佳，兩者表面粗糙度可相差近兩倍。圖27亦指出無超音波輔助加工的鑽石磨棒切屑會很明顯地附著在刀具表面。綜合實驗結果顯示：粒徑較大的鑽石磨棒鑽石磨粒脫落及磨耗的狀況較不嚴重，亦發現有超音波輔助加工能使切屑較不易附著在磨棒表面。粒徑較小的鑽石磨棒脫落及磨耗的情形較為嚴重，所產生的切屑亦較小。值得一提的是有超音波輔助加工可以降低微細的切屑回填於刀具表面造成刀具磨損增加喪失有效切削能力。

結論

本文透過超音波輔助加工之方法進行比較四種難切削材(鈦合金、Inconel

718、光學模具鋼與藍寶石)進行實驗測試，希望藉由不同難削材對超音波輔助

之敏感程度差異來檢視超音波輔助加工是否對於硬脆材與難削材都有一定的加工效能，達到高質化的切削效果，可得以下初步結論：適當的振幅對鈦合金與Inconel 718加工才會有較佳的效果，過大的振幅反而會使表面粗糙度急遽上升，刀具磨耗隨者加工時間增加與振幅的提高而增大。超音波輔助加工Inconel 718確實有助於降低工件的表面粗糙度，實際量測之最佳表面粗糙度值為0.167µm，與無超音波輔助比較可下降67%，振幅達5.04µm，刀具磨耗較明顯。光學模具鋼在有超音波輔助搭配振幅2.2µm時，表面粗糙度可達0.158µm。在有超音波輔助下可有效改善刀具磨耗的情形。藍寶石使用超音波輔助鑽石磨棒斜向進刀的方式其表面粗糙度較無超音波輔助斜向進刀來得佳且磨棒脫落及磨耗較少，此外切屑較不易附著在鑽石磨棒的磨削面上。未來的研究重點與方

向可針對以下幾點：脆性-延性的轉變機制，發展新的方法來判斷確定，減少僅透過觀察已加工之形貌來認定，降低主觀性。新的加工技術(如超聲振動輔助加工技術與雷射輔助加工技術)在硬脆材與難削材上的應用。由於材料的結構複雜性提高，對於材料次表層損傷與產生機制應更了解，臨界切深尺度的分析模型必須更精確，相信將有助於在難削材加工需求日益增加的情況下，為國內注入新的能量。■

致謝

本研究感謝科技部計畫「智慧多軸複合製造技術研發-航太與醫療器械先進製程設備」支持，並感謝中興大學機械工程系陳政雄教授在超音波輔助加工系統上的設備提供與技術指導。

參考資料

1. D. E. Brehl, T. A. Dow, Review of vibration-assisted machining, *Precision Engineering* 32 (2008) 153-172.
2. D. K. Baeka, T. J. Kob, S. H. Yang, Enhancement of surface quality in ultrasonic machining of glass using a sacrificing coating, *Journal of Materials Processing Technology* 213 (2013) 553-559.
3. C. Zhang, P. Feng, J. Zhang, Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 64 (2013) 38-48.
4. W. L. Cong, Z. J. Pei, T. W. Deines, D. F. Liu, C. Treadwell, Rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks using variable federate, *Composites : Part B* 52 (2013) 303-310.
5. D. Geng., D. Zhang., Y. Xu., F. He., D. Liu., Z. Duan, Rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of CFRP : Tool performance and surface integrity, *Ultrasonics* 59 (2015) 128-137.
6. V. Garcia Navasa, A. Sandaa, C. Sanza, D. Fernandez, J. Vleugelsb, K. Vanmeenselb, Surface integrity of rotary ultrasonic machined ZrO₂-TiN and Al₂O₃-TiC-SiC ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 35 (2015) 3927-3941.
7. M. Joshi, S. More, R. K. Singh, S. S. Joshi, V.K. Suri, Experimental characterization of hydrodynamic nanopolishing of flat steel plates, *Precision Engineering* 36 (2012) 424-434.
8. D. F. Liu, Y. J. Tang, W. L. Cong, A review of mechanical drilling for

composite laminates, Composite Structures 94 (2012) 1265-1279.

作者簡介



蔡明義
國立勤益科技大學機械工程學系教授
專長：
切削加工
半導體製程技術



林岳鋒
國立勤益科技大學機械工程學系
專長：
精密研磨拋光
難切削材加工



張嘉泰
國立勤益科技大學機械工程學系
專長：
超音波系統機構開發設計與輔助切削加工



楊家豪
國立勤益科技大學機械工程學系
專長：
超音波輔助切削